第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

硫酸盐渍土表观电导率与水分、盐分及粒径关系研究

周林虎[1]， 王昊宇[2]， 张秉来[1]， 祁兆鑫[1]， 曹荣泰[1]，
范延彬[1]， 孙生海[1]， 刘宇平[1]

（1. 中国电建集团青海省电力设计院有限公司，青海 西宁 810008；
2. 中国科学院地质与地球物理研究所，中国科学院页岩气与地质工程重点实验室，北京 100029）

摘 要：以西宁盆地北山地区小西沟流域为研究区，以区内硫酸盐渍土为研究对象，通过筛分试验得到了6组不同粒径（<0.075 mm、0.075~0.1 mm、0.1~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm）的土壤试样，测试了不同含水率、含盐量（Na_2SO_4）和粒径的土壤试样表观电导率（EC_a），分析了EC_a与含水率、含盐量和粒径之间的关系，并采用灰色关联法得到了EC_a与含水率和含盐量之间的灰色关联度。结果表明：（1）EC_a随着含水率、含盐量和粒径的增加均呈增大的变化规律，当粒径为0.075~0.1 mm，含盐量为0.64%，含水率由5%增加至25%时，EC_a增大0.99 $mS\cdot cm^{-1}$，增幅为2475%；当粒径为0.075~0.1 mm，含水率为10%，含盐量由0.18%增加至12.18%时，EC_a增大1.47 $mS\cdot cm^{-1}$，增幅为864.71%；当含盐量为6.18%，含水率为10%，粒径由<0.075 mm增加至1~2 mm时，EC_a增大0.36 $mS\cdot cm^{-1}$，增幅为38.71%。（2）通过建立EC_a、含水率和含盐量之间的关系模型，得出在较高含水率（>15%）条件下，EC_a与含盐量之间的相关关系（$P<0.05$）显著于低含水率（≤15%）条件（$P>0.05$），即当含水率分别为10%和20%，含盐量由3.18%增加至12.18%时，EC_a增幅分别为56.41%和128.91%，说明高含水率条件下盐分对EC_a的灵敏度显著于低含水率。（3）通过采用灰色关联分析法得到EC_a与含水率之间平均灰色关联度为0.80，与含盐量之间平均灰色关联度为0.68，说明当含水率为5%~25%，含盐量为0.18%~12.18%时，EC_a与含水率之间的发展态势一致性高于含盐量。该研究结果对于硫酸盐渍土导电特性和盐渍化程度评价具有参考价值。

关键词：硫酸盐渍土；表观电导率；含水率；含盐量；粒径；灰色关联度

盐渍土是一种在全球广泛分布的土壤类型，是一系列受盐碱作用的盐土、碱土及各种盐化、碱化土壤的总称[1]。土壤盐渍化是由自然环境因素或人为因素引起的一种主要的环境风险，自然因素包括气候、地质、地貌、水文等；人为因素包括人类改造和适应自然的各种不合理活动[1-4]。土壤盐渍化问题被认为是当今世界面临的最紧迫生态环境问题之一，也是全球农业生产力低下的主要环境限制因子之一[5-7]。如何快速、稳定和准确测定土壤含盐量，分析盐分分布情况和盐渍化程度，进而评价土体物理化学性质和工程地质特征成为地质勘察工作中亟待解决的重要问题。

土壤中的电导率可以直接反映出混合盐的含量，是衡量一个地区土壤盐渍化程度、评价土体工程地质特征和作物产量的重要指标。电导率法作为一种快速稳定测定土壤盐分时空分布特性的方法，被广泛应用于工程勘察和盐渍土研究[8]。有关土壤电导率方面的研究，国内外学者开展了大量试验，并取得了一系列丰硕成果。Kurtuluş等[9]研究了土耳其伊斯坦布尔-伊兹密特路旁的土壤在不同含水率条件下的电导率变化特征，并建立了基于电导率的土壤含水率计算模型，结果表明其电导率与含水率呈线性函数正相关关系。罗战友等[10]通过研究杭州淤泥质土电导率与含水量的关系，指出土体总电导率与实时含水量呈近似线性变化。陈仁朋等[11]通过研究饱和砂性土电导率与孔隙水关系，指

收稿日期：2020-10-31； **修订日期：**2020-12-16
基金项目：中国电建集团青海省电力设计院有限公司科研项目(63-KY2019-012)；中国电建集团青海省电力设计院有限公司科研项目(63-KY2019-013)
作者简介：周林虎（1995-），男，硕士研究生，主要从事地质工程和环境岩土工程方面的研究工作. E-mail: 18997295192@163.com
通讯作者：范延彬. E-mail: fyb1981@126.com

出在土壤孔隙水电导率一定的情况下，土壤孔隙率的增大会引起其电导率的增加。Brevik等[12]通过对美国爱荷华州立大学(Iowa State University)农学院农场不同点位土壤电导率进行原位测试，指出其电导率与含水率呈线性函数增大，且拟合优度R^2达到0.7以上。

亦有相关研究结果表明，土壤电导率随着含盐量增加呈不断增大的变化规律，且含水率越高，孔隙水含盐量变化对电导率的影响越大[13]。李相等[14]通过对新疆天山南麓渭干河-库车河三角洲绿洲土壤电导率与含盐量关系研究，指出电导率与含盐量的相关性较高，相关系数为0.9975，达到了极显著水平。Serrano等[15]通过对葡萄牙南部地区一农场土壤表观电导率(EC_a)进行测试，指出其与pH、淤泥含量和含水量具有显著正相关关系。Usha等[16]通过研究印度诺亚尔河(Noyyal River)两边田地土壤电导率变化特征，指出该地区土壤电导率随着pH值增大而不断减小。郑亚楠等[17]通过对新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市国家农业科技园区试验地不同深度内土壤电导率进行了测试，指出随着土壤深度的增加，其电导率逐渐降低。郭青林等[18]通过测试西北典型土遗址土壤电导率，指出含水率对土-水溶液电导率的影响整体上高于土颗粒。

通过综合分析已有研究成果，土壤电导率与其含水率、含盐量、孔隙率、pH值和取样深度等均具有显著的相关关系，但未见其与土体颗粒级配关系的研究，而不同粒组的土体其渗透性和孔隙率等亦有所区别，从而导致土体内部水分渗透速度、扩散程度和填充程度表现出较大差异，且现有的研究成果基本上只揭示了土壤电导率与相关影响因素之间的相互变化关系，并未从统计学角度分析这些影响因素对土壤电导率的影响程度。针对目前研究中存在的不足，通过测试不同含水率、含盐量和粒径的土壤试样EC_a，分析了其与水分、盐分和粒径之间的相关关系，并采用灰色关联法分析了EC_a与含水率和含盐量的灰色关联度，以期达到通过测试土壤EC_a来评价土壤盐渍化程度、物理化学性质和工程地质特征的目的。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

研究区位于青藏高原东北部湟水谷地中部的西宁盆地，地处青藏高原东北部与黄土高原西缘的交接地带，受青藏高原的影响，造就了该地区的特殊气候[19]。研究区内气候为寒冷半干旱高原大陆性气候，年均气温为5.6 ℃，年均降水量为386.2 mm，蒸发量为1762.8 mm，降水主要集中在每年6—9月，占全年降水量70%~80%，且多以暴雨和阵雨形式出现，具有历时短、强度大、降雨集中等特点[20-21]。

研究区内地形复杂，从山脊向谷地依次形成高山、中山、低山、丘陵、阶地、谷地等地形地貌，土壤质地由粗变细，地带性土壤为栗钙土，成土母质多为黄土，水土流失严重，重力滑坡较多[22]。盐渍土分布范围较广，主要类型为硫酸、亚硫酸盐渍土，其不仅具有黄土湿陷的特点，还具有盐胀性、腐蚀性[23]。由于该地区地形地貌、气候的耦合效应和盐渍土特定的岩土力学特征影响，使得该地区成为地质灾害的易发区[24]。通过对西宁盆地盐渍土易溶盐含量的测试，以及查阅研究区盐渍土的相关文献资料可知，区内盐渍土含盐量一般为0.3%~5.0%[25]，其中易溶盐主要是硫酸盐、亚硫酸盐，总面积约为5.223×10^4 km^2[26]。图1为试验区交通位置图。

1.2　试验土壤

试验用土取自西宁盆地北山地区小西沟流域某一边坡，在该边坡选取了一个10 m×10 m的正方形区域，在该区域内选取36处取样点，相邻取样点间隔均为2 m，取样深度为地表以下0~1 m，垂直方向每隔20 cm取一样品，即一个取样点位置取5份土样(图2)，共制取180份土样，每份质量约500 g，将

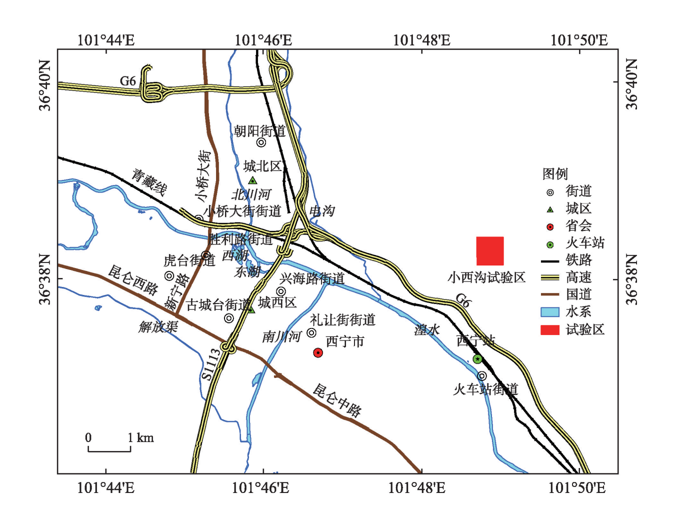


图1　试验区交通位置图

Fig. 1　Traffic location map of studying area

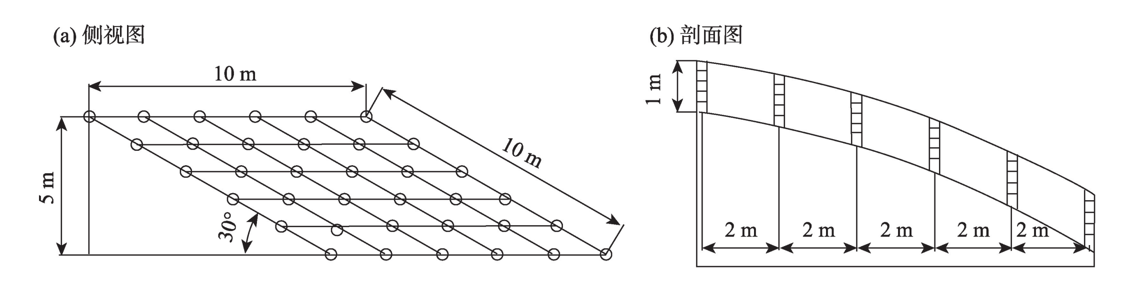


图2 试验区边坡取样点位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sampling point of slope in studying area

180份试样充分混合均匀，取其中3份试样进行全盐量和易溶盐离子的测试，得到土壤平均全盐量为6.43 $g\cdot kg^{-1}$，且 $c(Cl^-)/2c(SO_4^{2-})$ 的值为0.15，该值小于0.3，根据《工程地质手册》确定研究区土壤类型为中等硫酸盐盐渍土[27]。形成来源于其母岩第三系强风化泥岩，经地下水、地表水溶滤后，随水流从山坡带到山脚，经蒸发作用盐分凝聚而成[28]。

1.3 电导率测试仪器

CD-12型盐分电导温度仪是一种便携式常规分析仪器，可测量土壤电导率和温度，电导率测量范围为0~20 $mS\cdot cm^{-1}$。FJA-10型土壤盐分传感器具有结构简单、性能稳定、读数响应时间快、操作使用方便等优点。CD-12型盐分电导温度仪与FJA-10型土壤盐分传感器结合使用，具有电级性能稳定，电级灵敏度高的特点，是观测和研究盐渍土和水盐动态的重要工具，也是研究盐渍土发生、演变以及改良利用的理想的观测仪器。将这种盐分传感器埋入土壤后，可直接测定土壤电导率。

1.4 土壤导电机理

在含有一定水分的土壤中，其 EC_a 主要由大孔隙中的土壤溶液及其中的盐类物质所决定，因此 EC_a 与土壤的盐渍化程度有紧密的联系。土壤内部存在3种不同导电通路：固-液相串联耦合导电通路、大孔隙水连续液相导电通路和固相表面导电通路[29]（图3）。随着土壤含水率的变化，3种导电通路主导作用亦存在差异，即在低含水率条件下，水分优先填充细小孔隙，大孔隙得不到填充，故通路1和通路3起主导作用，随着含水率继续增加，3条导电通路均具有导电能力，且导电能力由强至弱依次为：通路2＞通路1＞通路3，随着含水率进一步增加至接近饱和状态时，由于水的浮力作用使得土体颗粒之间没有足够的直接接触，因此通路3的导电能力较弱，可忽略不计，且通路2的导电能力远大于通路1[13]。

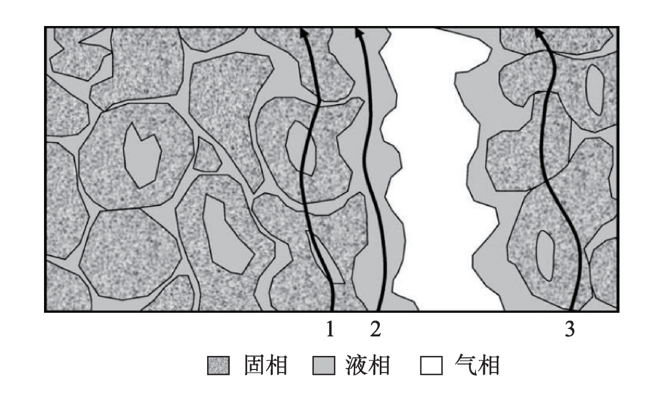


图3 土壤内部3种导电通路示意图[30]

Fig. 3 Schematic diagram of three kinds of conductive pathways in soil

1.5 含水率和含盐量梯度设定方法

将前面制取的土壤试样分成质量相等(300 g)的255组不同含水率、含盐量和粒径的重塑土壤试样，并进行正交试验。其中，粒径梯度由筛分后的粒组组成确定，分别为：<0.075 mm、0.075~0.1 mm、0.1~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm；为保证含盐量梯度的准确性和合理性，对原土样进行了洗盐试验，洗盐后得到含盐量为0.18%且含量一致的土壤试样，即以0.18%为初始梯度。考虑到区内盐渍化程度进一步加剧的趋势，含盐量梯度间隔设为3%，即含盐量梯度分别为：0.18%、3.18%、6.18%、9.18%、12.18%；区内制取的土壤试样其平均含水率为10%，考虑到西宁盆地降水主要集中在夏秋季，降雨形式主要为暴雨和阵雨，使得地表以下1.0 m深度内土壤具有较高含水率，因此，最大含水率设为25%，即含水率梯度分别为：5%、10%、15%、20%、25%。为使土壤、水分和盐分混合较均匀，对配置好的试样进行密封处理，静置24 h，然后测试其电导率。测试时，应特别注意的是每次要保证用力适度、均匀地将传感器压入土中，最后将得到的3组电

导率数据取平均值，即为该含水率、含盐量和粒径条件下的电导率值。图4所示为正交试验过程，该试验在室内进行，室温保持在20 ℃左右。

1.6 灰色关联分析法

灰色关联分析法是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度，即"灰色关联度"作为衡量因素间关联程度的一种方法。灰色关联分析法是一种多因素统计分析方法，其以各因素的样本数据为依据用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序，若样本数据反映出的两因素变化的态势（方向、大小和速度）基本一致，则关联度较大；反之，关联度较小。该方法的优点在于思路明晰，可以在很大程度上减少由于信息不对称带来的损失，并且对数据要求较低，工作量较少。为进一步分析区内土壤含水率和含盐量对其表观电导率影响程度，采用灰色关联分析法，以含水率和含盐量作为影响因子，分别计算EC_a与2个影响因子之间的关联度，从而确定2个影响因素对土壤表观电导率影响程度。灰色关联法计算方法如下[31-32]：

（1）设参考序列和比较序列：

$$X_1=\{X_{11}, X_{12}, \cdots X_{15}\} \tag{1}$$

$$X_2=\{X_{21}, X_{22}, \cdots X_{25}\} \tag{2}$$

$$X_3=\{X_{31}, X_{32}, \cdots X_{35}\} \tag{3}$$

式中：参考序列X_1表示土壤表观电导率数据序列；公式2和公式3为比较序列，X_2、X_3分别表示土壤含盐量、含水率的数据序列；X_{i1},X_{i2}, $\cdots X_{i5}$分别表示X_i中包含的原始数据。

（2）数据的无量纲化处理

参考序列和比较序列的量纲数量级均不相同，为保证数据分析结果可靠性，采用均值标准化处理方法对数据进行无量纲化处理，计算公式如下：

$$X_{ik}'=\frac{X_{ik}}{\bar{X}_i}, (k=1, 2, \cdots 5;\ i=1, 2, 3) \tag{4}$$

式中：X_{ik}'为无量纲化后的第i个数据列中第k个数据值；X_{ik}为第i个原始数据列中第k个数据值；$\bar{X}_i$为i个数据列中k个数据值的平均值。

（3）关联系数计算

关联系数反映参考序列与比较序列间每个值的关联程度，计算公式如下：

$$\zeta_{oi}(k)=\frac{\Delta\min+\rho\Delta\max}{\Delta oi(k)+\rho\Delta\max}, (k=1, 2, \cdots 5;\ i=2, 3) \tag{5}$$

式中：$\zeta_{oi}(k)$为参考数据列与比较数列对应数值的关联系数，$\Delta oi(k)$为参考数据列与比较数据列对应数值的绝对差值，$\Delta\max$为绝对差值中的最大值，$\Delta\min$为绝对差值中的最小值，ρ为分辨系数，通常取值为0.5。

（4）关联度计算

关联度为参考序列与比较序列之间所有对应数据关联系数的平均值，计算公式如下：

$$\gamma_{oi}=\frac{1}{5}\sum_{1}^{5}\zeta_{oi}(k), (k=1, 2, \cdots 5;\ i=2, 3) \tag{6}$$

式中：γ_{oi}为比较序列X_2和X_3与参考序列X_1的关联度。

2 结果分析

2.1 不同含水率和粒径条件下EC_a试验结果

由不同含水率和粒径条件下EC_a实测值及3者之间的三维关系曲线（含盐量为0.64%）可知（表1，图5），在相同粒径条件下，随着土壤含水率增加，EC_a均表现出不断增大的变化趋势，当粒径<0.075 mm，含水率由5%增加至10%时，EC_a由0.03 $mS\cdot cm^{-1}$增大至0.25 $mS\cdot cm^{-1}$，增幅为733.33%，该结果与


(a)


(b)

图4　正交试验过程

Fig. 4　The process of orthogonal test

表1 不同含水率和粒径条件下 EC_a 值

Tab. 1 EC_a of soil under different moisture content and particle size conditions /(mS·cm^{-1})

粒径/mm	含水率/%				
	5	10	15	20	25
<0.075	0.03±0.01	0.25±0.05	0.48±0.07	0.76±0.07	1.01±0.09
0.075~0.1	0.04±0.01	0.29±0.10	0.55±0.13	0.80±0.17	1.03±0.12
0.1~0.25	0.05±0.01	0.33±0.16	0.60±0.18	0.84±0.29	1.05±0.24
0.25~0.5	0.06±0.02	0.38±0.11	0.67±0.24	0.89±0.46	1.09±0.25
0.5~1	0.07±0.02	0.42±0.12	0.73±0.19	0.95±0.21	1.13±0.28
1~2	0.09±0.02	0.50±0.17	0.76±0.20	0.97±0.13	1.17±0.23

注:数据为平均值±标准差。下同。

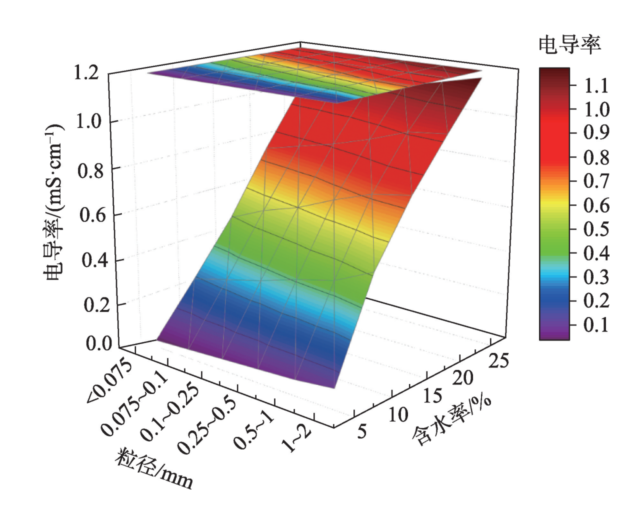


图5 土壤 EC_a 与含水率和粒径之间的三维关系曲线

Fig. 5 Three-dimensional relationship curve between EC_a of soil, particle size and moisture content

Kurtuluş[9]、陈仁朋[11]和刘旭[33]等的研究结果表现出一致性规律;在相同含水率条件下,随着土壤粒径增加,EC_a 亦表现出不断增大的变化趋势,当土壤含水率为20%,粒径由<0.075 mm增加至1~2 mm时,EC_a 值由0.76 mS·cm^{-1}增加至0.97 mS·cm^{-1},增幅为27.63%,这是由于大颗粒土壤具有相对较大的孔隙连通率和渗透系数[34-35],因此水分扩散较均匀,渗透速度较快,从而导致在相同含水率和渗透时间的条件下,大颗粒土壤 EC_a 大于小颗粒土壤。此外,通过对比不同粒径和含水率条件下 EC_a 增幅得出,含水率对 EC_a 的影响显著于粒径,即水分对 EC_a 的灵敏度高于粒径。

表2为不同粒径条件下 EC_a 与含水率之间的拟合方程,由该表可知,EC_a 与含水率之间符合幂函数正相关关系,且拟合优度 R^2 为0.9559~0.9900,残差平方和(RSS)为0.0046~0.0235,表现出相对较优异的拟合效果,且显著性系数 $P<0.01$,说明 EC_a 和含水率在0.01水平上显著相关,反映出 EC_a 和含水率具有极强的交互作用。徐志闻等[36]研究了西宁盆地长岭沟地区的黄土电导率与含水率之间的关系,结果表明电导率与含水率呈幂函数正相关关系,与本研究结果相一致。而罗战友等[10]对杭州地区淤泥土以及Brevik等[12]对美国爱荷华州立大学(Iowa State University)农学院不同点位土壤电导率的研究结果则表明,土壤电导率与含水率呈线性函数正相关关系,说明不同地区和类型的土壤电导率与含水率之间的函数关系亦存在差异性。

2.2 不同含盐量和粒径条件下 EC_a 试验结果

由不同含盐量和粒径条件下 EC_a 实测值及3者之间的三维关系曲线(含水率为10%)可知(表3,图6),在相同粒径条件下,随着土壤含盐量增加,EC_a 均表现出不断增大的变化趋势,当粒径<0.075 mm,

表2 不同粒径条件下 EC_a 值与含水率之间的拟合方程

Tab. 2 Fitting equation of EC_a of soil and moisture content under different particle size conditions

粒径/mm	拟合方程	拟合优度(R^2)	残差平方和(RSS)	显著性系数(P)
<0.075	$y=0.0071x^{1.5470}$	0.9900	0.0046	1.4213×10^{-4}
0.075~0.1	$y=0.0116x^{1.4018}$	0.9837	0.0076	2.6167×10^{-4}
0.1~0.25	$y=0.0164x^{1.3024}$	0.9773	0.0108	3.8852×10^{-4}
0.25~0.5	$y=0.0230x^{1.2099}$	0.9673	0.0164	6.0342×10^{-4}
0.5~1	$y=0.0292x^{1.1499}$	0.9576	0.0228	8.3150×10^{-4}
1~2	$y=0.0385x^{1.0717}$	0.9559	0.0235	7.6895×10^{-4}

表3 不同粒径和含盐量条件下EC_a值

Tab. 3 EC_a of soil under different particle size and salt content conditions /(mS·cm^{-1})

粒径/mm	含盐量/%				
	0.18	3.18	6.18	9.18	12.18
<0.075	0.16±0.04	0.87±0.11	0.93±0.10	1.11±0.17	1.57±0.32
0.075~0.1	0.17±0.04	0.90±0.13	0.97±0.09	1.19±0.12	1.64±0.25
0.1~0.25	0.19±0.06	0.92±0.08	1.01±0.12	1.28±0.16	1.70±0.33
0.25~0.5	0.20±0.04	0.98±0.14	1.08±0.16	1.37±0.21	1.73±0.20
0.5~1	0.22±0.05	1.07±0.18	1.23±0.21	1.44±0.32	1.76±0.38
1~2	0.24±0.09	1.14±0.20	1.29±0.23	1.59±0.40	1.81±0.36

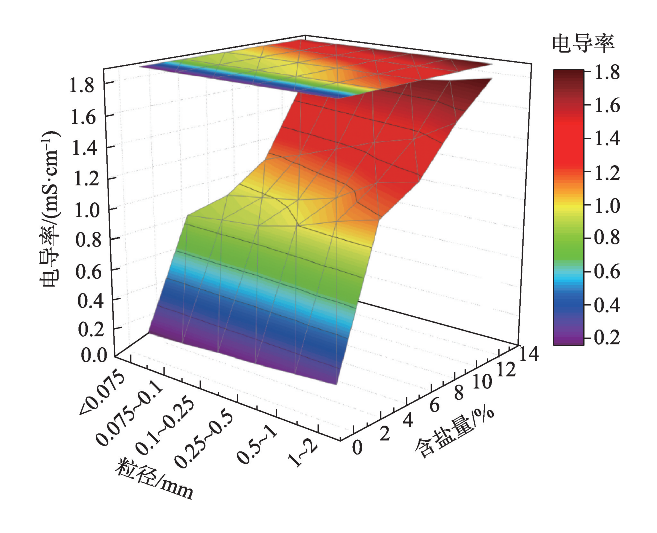


图6 土壤EC_a与含盐量和粒径的三维关系曲线

Fig. 6 Three-dimensional relationship curve between EC_a of soil, salt content and particle size

含盐量由0.18%增加至12.18%时，EC_a值由0.16 mS·cm^{-1}增大至1.57 mS·cm^{-1}，增大1.41 mS·cm^{-1}，增幅为881.25%；在相同含盐量条件下，随着土壤粒径增加，EC_a亦表现出不断增大的规律，例如当含盐量为0.18%时，随着粒径的不断增加，EC_a由0.16 mS·cm^{-1}增大至0.24 mS·cm^{-1}。由图6可知，当土壤粒径相同，含盐量由0.18%增加至3.18%时，EC_a增幅相对较大，而在后续含盐量增加过程中，EC_a增幅有所减小，例如当粒径<0.075 mm，含盐量由0.18%增加至3.18%时，EC_a增幅为443.8%，而当含盐量由3.18%增加至6.18%时，EC_a增幅仅为6.90%。出现该现象的原因主要是由于0.18%的含盐量相对较小，溶解于水中的盐分亦相对较少，导致产生的导电离子较少；而随着含盐量突然增大，有更多的盐分溶解于水中，导电离子亦突然增加；随着盐分进一步增加，达到其溶解度时，一部分盐分仍以固态形式存在，因此未对EC_a产生显著增强作用。

从不同粒径条件下EC_a与含盐量之间的拟合方程（表4）可知，EC_a与含盐量之间符合二次函数正相关关系。通过比较6种粒径条件下土壤电导率与含盐量之间拟合方程的拟合优度和显著性水平，得出随着土壤粒径的增大，拟合优度由0.8232增加至0.9133，显著性系数由0.0884降低至0.0433，说明随着土壤粒径增大，电导率与含盐量之间的相关性愈来愈强，该结果亦表明大颗粒土壤内部存在相对较大孔隙和连通率，使得土壤内部水分和盐分混合较均匀，从而使得更多盐分溶解于水中，产生更多导电离子。

2.3 不同含水率和含盐量条件下EC_a试验结果

从不同含水率和含盐量条件下土壤EC_a实测数据及3者之间的三维关系曲线可知（表5，图7），随着含水率和含盐量的增加，EC_a表现出不断增大的变化规律，当含盐量和含水率分别为0.18%和5%

表4 不同粒径条件下EC_a与含盐量的拟合方程

Tab. 4 Fitting equation between EC_a of soil and salt content under different particle size conditions

粒径/mm	拟合方程	拟合优度(R^2)	残差平方和(RSS)	显著性系数(P)
<0.075	y=−0.0030x^2+0.1393x+0.2367	0.8232	0.0918	0.0884
0.075~0.1	y=−0.0033x^2+0.1479x+0.2429	0.8480	0.0868	0.0760
0.1~0.25	y=−0.0035x^2+0.1558x+0.2532	0.8816	0.0727	0.0592
0.25~0.5	y=−0.0052x^2+0.1788x+0.2571	0.8911	0.0703	0.0544
0.5~1	y=−0.0080x^2+0.2141x+0.2714	0.8941	0.0706	0.0529
1~2	y=−0.0096x^2+0.2384x+0.2806	0.9133	0.0631	0.0433

表5 不同含水率和含盐量条件下EC_a值

Tab. 5 EC_a of soil value under different moisture content and salt content conditions /(mS·cm^{-1})

含盐量/%	含水率/%				
	5	10	15	20	25
0.18	0.06±0.03	0.25±0.07	0.33±0.03	0.72±0.05	1.11±0.24
3.18	0.29±0.04	1.17±0.20	2.27±0.39	5.43±1.09	8.90±1.49
6.18	0.38±0.04	1.30±0.26	3.03±0.41	8.56±1.54	12.54±2.09
9.18	0.52±0.06	1.64±0.22	3.99±0.55	10.05±1.59	14.99±1.51
12.18	0.64±0.07	1.83±0.35	4.68±0.95	12.43±1.73	17.05±2.56

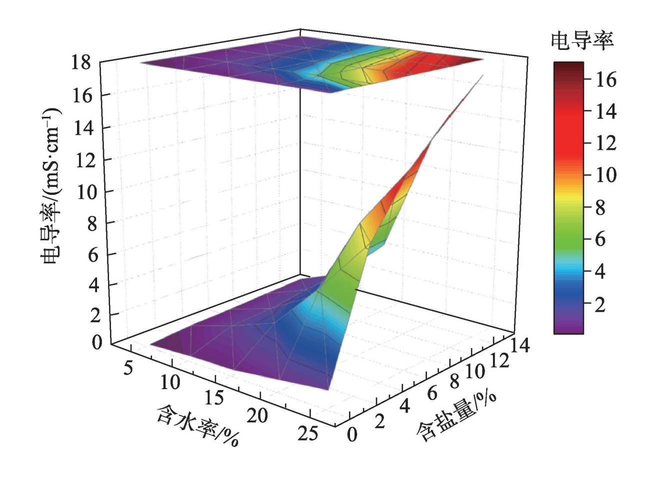


图7 EC_a与含水率和含盐量之间的三维关系曲线

Fig. 7 Three-dimensional relationship curve between EC_a of soil, moisture content and salt content

时,EC_a为0.06 mS·cm^{-1},而当含盐量和含水率分别为12.18%和25%时,EC_a为17.05 mS·cm^{-1},增大16.99 mS·cm^{-1}。当含水率越高时,盐分对土壤电导率的影响越大,Corwin等[30]的研究结果亦表明黏土含水率越高,孔隙水含盐量变化对电导率的影响越大。这是由于当土体含水率进一步增加,使得土体颗粒间较大孔隙由连续的重力水联通,并且这种较大孔隙中的重力水进一步溶解土壤中的盐分,在该条件下土壤电导率将快速增加[36]。根据Delaney等[35]的研究,土壤电导率与离子浓度和迁移率呈正比,因此,随着含水率的增加,由于盐分离子的运动和迁移,在孔隙流体中的连续膜产生更多的导电性[37]。

由不同含盐量条件下EC_a与含水率之间的拟合方程可知(表6),EC_a与其含水率呈幂函数关系不断增大,拟合优度为0.9710~0.9945,显著性水平均小于0.01,表现出了较优异的拟合效果和相关性;由不同含水率条件下EC_a与含盐量之间的拟合方程可知(表7),EC_a与含盐量呈二次函数关系,且当其含水率不同时,拟合方程显著性水平亦表现出显著差异性,即当含水率分别为5%、10%和15%时,方程显著性水平分别为0.0122、0.0450和0.0116,而当含水率为20%和25%时,拟合方程显著性水平分别为0.0086和0.0094,说明这高含水率条件下,EC_a与含盐量相关性显著高于低含水率条件,该结果亦说明了高含盐量条件下,高含水率对EC_a灵敏性亦高于低含水率。

2.4 EC_a与其含盐量和含水率的关联度

从EC_a与其含水率和含盐量之间的灰色关联度可知(表8,表9),在5种含盐量条件下,EC_a与含水率之间的灰色关联度为0.771~0.833,当含盐量为9.18%时,EC_a与含水率之间的灰色关联度最高,说明该含盐量条件下土壤电导率与含水率之间的发展态势一致性最高;而当含盐量为3.18%时,EC_a与含水率之间的灰色关联度相对低于其他4种含盐量

表6 不同含盐量条件下EC_a与含水率的拟合方程

Tab. 6 Fitting equation between EC_a of soil and moisture content under different salt content conditions

含盐量/%	土壤电导率与含水率拟合方程	拟合优度(R^2)	残差平方和(RSS)	显著性水平(P)
0.18	$y=0.0019x^{1.9837}$	0.9804	0.0104	4.7251×10^{-4}
3.18	$y=0.0038x^{2.4149}$	0.9945	0.2070	9.1196×10^{-5}
6.18	$y=0.0060x^{2.3830}$	0.9785	1.7457	7.3282×10^{-4}
9.18	$y=0.0088x^{2.3191}$	0.9867	1.4969	3.4237×10^{-4}
12.18	$y=0.0144x^{2.2104}$	0.9710	4.4105	0.0011

表7　不同含水率条件下EC_a与含盐量的拟合方程

Tab. 7　Fitting equation between EC_a of soil and salt content under different moisture content conditions

含水率/%	土壤电导率与含盐量拟合方程	拟合优度(R^2)	残差平方和(RSS)	显著性水平(P)
5	$y=-0.0014x^2+0.0630x+0.0644$	0.9757	0.0024	0.0122
10	$y=-0.0099x^2+0.2436x+0.2899$	0.9100	0.0674	0.0450
15	$y=-0.0183x^2+0.5730x+0.3449$	0.9768	0.1317	0.0116
20	$y=-0.0500x^2+1.5527x+0.6521$	0.9828	0.7059	0.0086
25	$y=-0.1004x^2+2.5066x+1.0689$	0.9812	1.4804	0.0094

表8　不同含盐量条件下EC_a与含水率的灰色关联度

Tab. 8　Grey correlation degree between EC_a and moisture content under different salt content conditions

土壤含水率/%	土壤含盐量/%				
	0.18	3.18	6.18	9.18	12.18
5	0.825	0.873	1.000	1.000	1.000
10	0.919	0.767	0.807	0.801	0.771
15	0.666	0.738	0.809	0.848	0.833
20	1.000	1.000	0.904	0.957	0.831
25	0.476	0.475	0.559	0.560	0.582
灰色关联度	0.777	0.771	0.816	0.833	0.803

表9　不同含水率条件下EC_a与含盐量的灰色关联度

Tab. 9　Grey correlation degree between EC_a and salt content under different moisture content conditions

土壤含盐量/%	土壤含水率/%				
	5	10	15	20	25
0.18	0.536	0.707	0.893	1.000	1.000
3.18	0.368	0.438	0.507	0.596	0.549
6.18	1.000	1.000	1.000	0.725	0.786
9.18	0.579	0.728	0.878	0.767	0.875
12.18	0.346	0.401	0.451	0.485	0.452
灰色关联度	0.565	0.655	0.745	0.715	0.733

条件,但也达到了0.771,仍然具有高相关度(表8)。EC_a与含盐量的灰色关联度为0.565~0.745,随着含水率由5%增加至25%,EC_a与含盐量的灰色关联度表现出先增大后减小的变化趋势,最小值出现在含水率为5%时,说明低含水率条件下EC_a与含盐量的关联程度亦相对较低(表9)。通过综合比较EC_a与含水率和含盐量之间的灰色关联度,EC_a与含水率和含盐量之间的平均灰色关联度分别为0.80和0.68,即EC_a与含水率之间的相关程度显著于含盐量,亦说明EC_a与水分之间的发展趋势一致性显著于盐分(Na_2SO_4)。

3　结 论

(1) 研究区土壤含水率由5%增加至25%时(含盐量为0.64%),6组不同粒径土壤表观电导率与含水率之间呈幂函数正相关关系,方程拟合优度R^2为0.9559~0.9900,显著性系数P小于0.01,说明土壤表观电导率与含水率之间具有极强的交互作用和相关关系。

(2) 土壤含盐量由0.18%增加至12.18%时(含水率为10%),6组不同粒径土壤表观电导率与含盐量之间呈二次函数正相关关系,方程拟合优度R^2为0.8232~0.9133,显著性系数P小于0.05,说明在该含水率条件下,土壤表观电导率与含盐量之间具有较强的交互作用和相关关系。

(3) 土壤粒径由<0.075 mm增加至1~2 mm时,其表观电导率亦表现出不断增大的变化趋势,但粒径引起的变化不及水分和盐分显著,说明粒径对土

壤表观电导率的影响作用弱于水分和盐分。

（4）通过分析不同含水率和含盐量条件下土壤表观电导率变化特征，含水率越高时，盐分变化对土壤电导率的影响越大，即当含水率为5%和20%，含盐量由0.18%增加至12.18%时，电导率分别增大0.58 mS·cm^{-1}和15.94 mS·cm^{-1}；通过灰色关联分析法表明，土壤表观电导率与含水率的平均关联度为0.80，与含盐量的平均关联度为0.68，这说明土壤含水率为5%~25%，含盐量为0.18%~12.18%时，其表观电导率与水分的变化趋势一致性显著于盐分。

参考文献（References）：

[1] He F, Xie T, Xie G, et al. Vertical migrating and cluster analysis of soil mesofauna at Dongying halophytes garden in Yellow River Delta[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 21(1): 25–30.

[2] Flowers T J, Colmer T D. Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes[J]. Annals of Botany, 2015, 115(3): 327–331.

[3] Su Y, Luo W, Lin W, et al. Model of cation transportation mediated by high-affinity, potassium transporters in higher plants[J]. Biological Procedures Online, 2015, 17: 1. https://doi.org/10.1186/s12575-014-0013-3.

[4] Hameed A, Gulzar S, Aziz I, et al. Effects of salinity and ascorbic acid on growth, water status and antioxidant system in a perennial halophyte[J]. AoB Plants, 2015, 7: 1–11.

[5] Griggs D, Stafford-Smith M, Gaffney O, et al. Policy: Sustainable development goals for people and planet[J]. Nature, 2013, 495 (74): 305–307.

[6] Güler M, Arslan H, Cemek B, et al. Long-term changes in spatial variation of soil electrical conductivity and exchangeable sodium percentage in irrigated mesic ustifluvents[J]. Agricultural Water Management, 2014, 135(4): 1–8.

[7] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 81: 108–123.

[8] 张顺, 贾永刚, 连胜利, 等. 电导率法在土壤盐渍化中的改进和应用进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 754–759. [Zhang Shun, Jia Yonggang, Lian Shengli, et al. Application and improvement of electrical conductivity measurements in soil salinity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 754–759.]

[9] Kurtuluş C, Yeken T, Durda D. Estimating the soil water content using electrical conductivity, oven method and speedy moisture Tester[J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52(12): 1577–1582.

[10] 罗战友, 陶燕丽, 周建, 等. 杭州淤泥质土的电渗电导率特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊1): 3222–3228. [Luo Zhanyou, Tao Yanli, Zhou Jian, et al. Study on electro-osmotic conductivity of Hangzhou silty soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Suppl.): 3222–3228.]

[11] 陈仁朋, 陈伟, 王进学, 等. 饱和砂性土孔隙水电导率特性及测试技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 780–783. [Chen Renpeng, Chen Wei, Wang Jinxue, et al. Electrical conductivity of pore water in saturated sand and its measurement technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 780–783.]

[12] Brevik E C, Fenton T E, Lazari A. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(6): 393–404.

[13] 李瑛, 龚晓南, 郭彪, 等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 4027–4032. [Li Ying, Gong Xiaonan, Guo Biao, et al. Research on conductivity characteristics of soft clay during electro-osmosis and its conductive mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl. 2): 4027–4032.]

[14] 李相, 丁建丽, 侯艳军, 等. 干旱半干旱区土壤含盐量和电导率高光谱估算[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1050–1058. [Li Xiang, Ding Jianli, Hou Yanjun, et al. Estimating the soil salt content and electrical conductivity in semi-arid and arid areas by using hyperspectral data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37 (4): 1050–1058.]

[15] Serrano J M, Shahidian S, Marques da Silva J. Spatial variability and temporal stability of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(2): 245–263.

[16] Usha L, Pandya H M. Role of soil electrical conductivity (EC) and pH in the suitability prognosis of agricultural practices in Noyyal River Basin[J]. International Journal of Research in Science, 2015, 2(1): 6–12.

[17] 郑亚楠, 支金虎, 刘海江, 等. 不同改良措施对沙化土壤水分、pH值和电导率的影响[J]. 塔里木大学学报, 2020, 32(3): 61–71. [Zheng Yanan, Zhi Jinhu, Liu Haijiang, et al. Effects of different improvement measures on water content, pH value and conductivity of sandy soil[J]. Journal of Tarim University, 2020, 32(3), 61–71.]

[18] 郭青林, 周杰, 裴强强, 等. 电导率在土遗址易溶盐快速测定中的研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 891–901. [Guo Qinglin, Zhou Jie, Pei Qiangqiang, et al. Study and application of electrical conductivity to rapid determination of salt content in Earthen sites[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 891–901.]

[19] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器[J]. 兰州大学学报, 1996, 32(1): 108–115. [Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and river and amplifier of the global climatic change[J]. Journal of Lanzhou University, 1996, 32 (1): 108–115.]

[20] 孙恺. 西宁盆地地下热水循环机制与资源评价[D]. 西安: 西北大学, 2015. [Sun Kai. The Underground Hot Water Circulation Mechanism and the Resource Evaluation in Xining Basin[D]. Xi'an: Northwest University.]

[21] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3445-3452. [Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl. 2): 3445-3452.]

[22] 严焕德. 西宁盆地末次冰期晚冰阶古气候变化的黄土记录[D]. 重庆: 西南大学, 2007. [Yan Huande. Paleoclimatic Change During Late Stadial of the Last Glaciation Based on Loess from Xining Basin[D]. Chunqing: Southwest University, 2007.]

[23] 王智明. 西宁黄土状盐渍土作为回填材料的研究[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(6): 316-320. [Wang Zhiming. Study on the loess-like saline soil as backfill material in Xining[J]. 2009, 23(6): 316-320.]

[24] 孙毅. 西宁市黄土滑坡发育特征及稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2013. [Sun Yi. The Development Characteristics and Stability Analysis of Xining Loess Landslide[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.]

[25] 罗友弟. 青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 116-120. [Luo Youdi. Investigation of the distribution of saline soil in Qinghai and its unique engineering properties[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 116-120.]

[26] 刘亚斌. 青藏高原东北部黄土区植物降盐效应评价及其增强边坡稳定性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Liu Yabin. Research on Evaluation of Salt Tolerance and Salt Reduction Effect of Plants and their Enhancement of Slope Stability in Xining Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]

[27] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. [Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological Engineering Handbook[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007.]

[28] 王智明. 西宁黄土状盐渍土地区工程建设中值得重视的问题[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(3): 79-82. [Wang Zhiming. The problems of great importance in the progect construction of the region of loess-like saline soil in Xining[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(3): 79-82.]

[29] Friedman S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1-3): 45-70.

[30] Corwin D L, Lesh S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture 2005, 46(1-3): 11-43.

[31] 赵领娣, 冯剑, 孙凌霄, 等. 中国西北干旱区城市水、大气污染排放与FDI关系研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 67-73. [Zhao Lingdi, Feng Jian, Sun Lingxiao, et al. Relationship between water & air pollutant emission and FDI in arid cities in Northwest China [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 67-73.]

[32] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 等. 塔里木盆地中北部绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 963-970. [He Zhenzhen, Wang Hongwei, Yang Shengtian, et al. Evaluation on ecological security and analysis of influence factors of oasis in Northwest arid region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 963-970.]

[33] 刘旭, 迟春明. 盐渍土溶液电导率与渗透势换算关系及其在盐度分级中的应用[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(10): 2481-2484. [Liu Xu, Chi Chunming. Relationship between osmotic potential and electrical conductivity of salt-affected soil solutions and its application on salinity degree of salt-affected soil[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(10): 2481-2484.]

[34] 陈泽华. 弹性颗粒粒径与渗透率的匹配关系研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016. [Chen Zehua. Research on the Matching Relation Between the Diameter of Elastical Particle and Permeability of the Formation[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2016.]

[35] Delaney A J, Peapples P R, Arcone S A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil[J]. 2001, 32 (2-3): 107-119.

[36] 徐志闻, 刘亚斌, 胡夏嵩, 等. 基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 148-154. [Xu Zhiwen, Liu Yabin, Hu Xiasong, et al. Salt content estimation model of saline soil in Xining basin based on water content and in-situ electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 148-154.]

[37] Oh M H, Lee J H, Yoon G L, et al. Pilot-scale field model tests for detecting landfill leachate intrusion into the subsurface using a grid-net electrical conductivity measurement system[J]. Environmental Geology, 2003, 45(2): 181-189.

The relationship between EC_a of sulfate saline soil and moisture content, salt content, and particle size

ZHOU Linhu[1], WANG Haoyu[2], ZHANG Binglai[1], QI Zhaoxin[1], CAO Rongtai[1], FAN Yanbin[1], SUN Shenhai[1], LIU Yuping[1]

(1. Power China Qinghai Electric Power Engineering Co., Ltd., Xining 810008, Qinghai, China;
2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: This study first measured the sulfate saline soil in the Xiaoxigou basin of the Beishan area in the Xining Basin, China. Five groups of soil samples with different particle sizes (<0.075 mm, 0.075−0.1 mm, 0.1−0.25 mm, 0.25−0.5 mm, 0.5−1 mm, and 1−2 mm) were obtained through the screening test. The apparent electrical conductivity (EC_a) of the soil samples with different moisture contents, salt contents (Na_2SO_4), and particle sizes were then tested, and the relationship between EC_a and moisture content, salt content, and particle size were analyzed, and the gray correlation degree was obtained using the gray correlation method. The results showed that increased moisture content, salt content, and particle size resulted in an increasing change law for EC_a. For example, when the particle size was 0.075−0.1 mm, the salt content was 0.64%, and the moisture content increased from 5% to 25%, EC_a increased by 0.99 mS·cm^{-1}, an increase amplitude of 2475%. When the relationship model between EC_a, moisture content and salt content was established, it was concluded that under higher moisture contents (greater than 15%), the correlation between EC_a and salt content ($P<0.05$) was significantly higher than that of low moisture content conditions (less than 15%) ($P>0.05$). For example, when the moisture content was 10% or 20%, and the salt content increased from 3.18% to 12.18%, the increased amplitudes of EC_a were 56.41% and 128.91%, respectively, indicating that the sensitivity of salt to EC_a under high moisture content conditions was more significant than the low moisture content. The average gray correlation degree between EC_a and the moisture content was 0.80, and between EC_a and salt content was 0.68. This indicates that the consistency of the development trend between EC_a and moisture content was higher than that of the salt content, when the moisture content was 5%−25%, and the salt content was 0.18%−12.18%. These research results have reference value for the evaluation of the electrical conductivity and salinization degree of sulfate saline soil.

Keywords: sulfate saline soil; apparent electrical conductivity; water content; salt content; particle size; grey correlation